

The precipitation of high-energy charged particles in a middle latitude lower ionosphere during periods of disturbances at different nature. The results of experimental studies

Alexander M. Gokov

*Kharkiv National University of Economics n.a. Semen Kuznets
Kharkiv, 61166, Ukraine
amg_1955@mail.ru*

Abstract: *On the basis of long-term targeted experimental measurements (during 1982-2015) by method of partial reflections in the mid-latitudes near Kharkov the main parameters of the ionospheric D-region and characteristics of reflected HF signals and radio noise that was made in times of natural disturbances (strong earthquakes, thunderstorms, solar terminator, solar flares, magnetic storms, powerful processes in the atmosphere, and others) and anthropogenic origin, is shown authentically (confirmed) the possibility of precipitation of high-energy charged particles in the middle latitude lower ionosphere. Possible mechanisms is discussed. There are considered the estimates and calculations of particle flows, variations of the lower ionosphere parameters.*

Keywords: *method of partial reflections, the lower ionosphere, precipitation of high-energy charged particles, the disturbances of natural and anthropogenic origin, the particle flows.*

Высыпания высокоэнергичных заряженных частиц в среднеширотной нижней ионосфере в периоды возмущений разной природы. Результаты экспериментальных исследований

Гокков А.М.

*Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеца
г. Харьков, 61166, Украина
amg_1955@mail.ru*

Аннотация: *На основе длительных целенаправленных экспериментальных измерений (в период 1982–2015 гг.) методом частичных отражений в средних*

широтах вблизи г. Харькова основных параметров D-области ионосферы и характеристик отраженных КВ сигналов и радиошумов, выполненных в периоды возмущений естественного (сильные землетрясения, грозы, солнечный терминатор, солнечные вспышки, магнитные бури, мощные процессы в атмосфере и др.) и антропогенного характера, достоверно показана (подтверждена) возможность выпадения высокоэнергичных заряженных частиц в среднеширотной нижней ионосфере. Обсуждаются возможные механизмы, приводятся оценки и расчеты потоков частиц, вариации параметров нижней ионосферы.

Ключевые слова: метод частичных отражений, нижняя ионосфера, выпадения высокоэнергичных заряженных частиц, возмущения естественного и антропогенного характера, потоки частиц.

1. Введение

Высыпающиеся из радиационных поясов энергичные электроны с энергией $\varepsilon \geq 40$ кэВ являются существенным источником дополнительной ионизации ионосферы (до широт $\sim 45 - 60^\circ$) на высотах $z \approx 80 - 100$ км. Кроме этого в период солнечных вспышек и магнитных бурь в спутниковых измерениях регистрируются повышенные по сравнению с невозмущенными условиями значения потоков протонов. Такие потоки протонов проникают до высот нижней части D-области ($z \approx 55 - 75$ км) и могут вызывать заметное изменение ионизации в этой части ионосферы. В ХНУ имени В.Н. Каразина с помощью метода частичных отражений (ЧО) [1] в течение последних 30 лет проводятся регулярные исследования отклика среднеширотной D-области в периоды возмущений антропогенного (удаленные старты и полеты ракет) и естественного (сильные грозы, солнечные вспышки и магнитные бури (МБ), солнечный терминатор, сильные землетрясения, затмения Солнца, процессы в атмосфере и др.) характера (см., напр., [2-6]). Одной из главных особенностей исследований является то, что в периоды перечисленных событий статистически достоверно регистрировались характерные изменения характеристик ЧО КВ сигналов и радиошумов, возмущения концентрации электронов $N(z)$ в среднеширотной D-области на $\sim 50-150\%$ (и более) с характерными периодами и длительностями, которые отсутствуют в невозмущенных условиях. Анализ большого числа экспериментальных данных и вариаций параметров космической погоды позволил интерпретировать такие вариации характеристик ЧО сигналов, радиошумов и $N(z)$ с помощью гипотезы о выпадениях высокоэнергичных электронов и протонов. Подтверждением этой гипотезы является то, что в ряде экспериментов в периоды сильных МБ в течение единиц–десятков минут визуально наблюдались (и регистрировались)

свечения ночного неба типа «полярного» сияния. Оценки энергетических характеристик потоков заряженных частиц, выполненные по методике [7] по экспериментальным данным показали, что они сходны по величине и не противоречат известным литературным данным. В работе обсуждаются названные характерные особенности и возможность высыпаний высокоэнергичных заряженных частиц в среднеширотную D-область ионосферы.

2. Основные практические результаты

Далее рассмотрим характерный пример измерения амплитуд ЧО сигналов и радиошумов, выполненных в период МБ в декабре 2006 г [6]. Наблюдения проводились в течение 22 дней циклами до, в период и после МБ вблизи г. Харькова (географические широта $49^{\circ} 38'N$ и долгота $36^{\circ} 20' E$) при помощи комплекса аппаратуры [1] методом ЧО. Важно, что эксперименты проводились и в периоды прохождений утреннего и вечернего солнечного терминаторов (УСТ и ВСТ соответственно). Во время эксперимента регистрировались высотно-временные зависимости амплитуд смеси ЧО сигнала и радиошума $A_{so,x}(z,t)$ (где t - время, индексы "о" и "х" соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 22 высотных уровней, начиная с 60 км через $\Delta z=3$ км. непрерывными сеансами длительностью единицы-десятки часов. Для выделения амплитуд ЧО сигналов $A_{o,x}(z,t)$ записывались также амплитуды радиошума $A_{no,x}(t)$, в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса.

Во время МБ 7 декабря в светлое время суток в интенсивные ЧО сигналы (отношение сигнал/помеха $s = 15-70$) наблюдались в области высот $z < 70$ км. В невозмущенных условиях ЧО сигналы с $s > 1$ в средних широтах регистрируются редко с высот < 70 км, что обусловлено малыми значениями концентрации электронов в этой области высот. В темное время суток почти во всей D-области эпизодически регистрировались ЧО сигналы с $s > 5 - 20$. Эти два факта свидетельствуют о том, что в эти сутки ионизация в D-области, по-видимому, частично контролировалась потоками высыпающихся протонов (по крайней мере – на высотах ниже примерно 80 км, что не противоречит известным положениям [6]). Вариации концентрации электронов 7 декабря показаны на рис. 1. Отчетливо видно, что значения N в эти сутки на 63 – 84 км были повышенными по сравнению с невозмущенными (в темное время в первой половине суток имели

место как значительное повышение N , так ее и квазипериодические вариации во все D-области. Важно, что примерно такие же вариации $N(z,t)$ имели место в предыдущие часы в темное время в предыдущие сутки.).

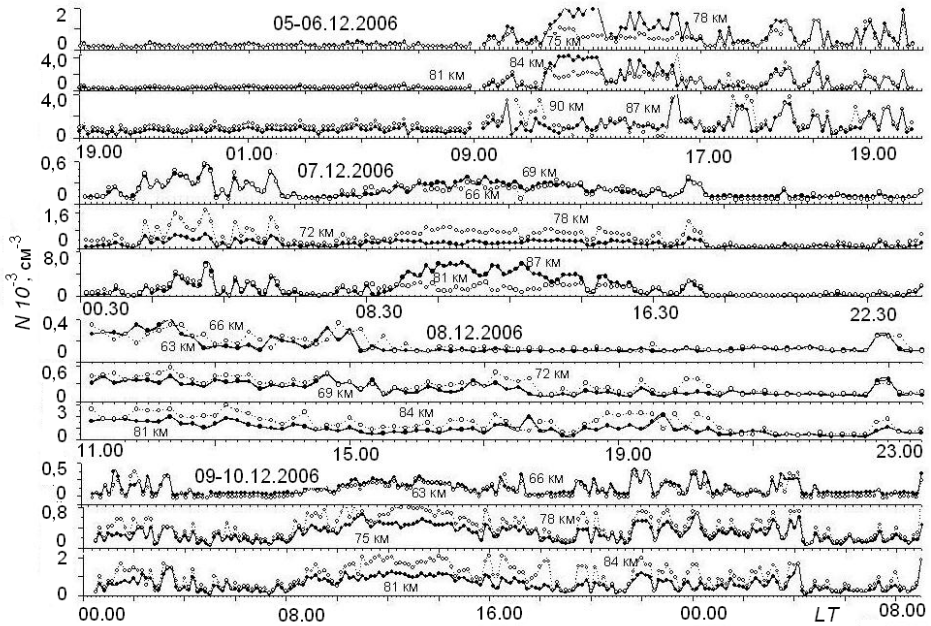


Рис. 1. Вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в среднеширотной D-области 5 – 10 декабря 2006 г.
 Fig. 1. Variations of the electron density at a fixed height in the mid-latitude D-region at 5 – 10 December, 2006

Ионизация в D-области, по-видимому, частично контролировалась потоками высыпающих протонов. Отметим также, что в темное время во второй половине суток значения N были на уровне типичных для этого времени года невозмущенных фоновых значений. 9 и 10 декабря в течение всего светлого времени суток $s = 10 - 500$ на высотах 63–87 км. В темное время суток как утром, так и вечером $s = 1 - 50$ в течение нескольких часов. В эти периоды имели место квазипериодические вариации $N(z,t)$ с амплитудой более 100%, периодом $T \approx 40 - 50$ мин и длительностью 1 – 3 периода. Характерно, что через 120 – 40 минут (63 – 87 км) после прохождения ВСТ $s \gg 1$. В период прохождения ВСТ и в течение десятков минут после него значения $s(z,t)$, как и в предыдущие сутки, сравнительно плавно

уменьшились до $s = 0,5 - 2$. Важно так же то, что в темное время суток через десятки–сотни минут (для 87 – 63 км) после прохождения ВСТ в течение 3 – 8 часов регистрировались интенсивные ЧО сигналы. Отметим, что такое поведение $s(z, t)$ не характерно для измерений в среднеширотной D-области, поскольку, как правило, в ночные часы в невозмущенных условиях концентрация электронов намного меньше, чем в светлое время суток и поэтому уровень ЧО сигналов мал по сравнению с уровнем радишумов. Анализ геофизических данных показал, что наиболее вероятной причиной такого поведения ЧО сигналов, по-видимому, были высыпания высокоэнергичных частиц после МБ, которые могли быть инициированы прохождением ВСТ (т. е. является результатом проявления повторного взаимодействия системы ионосфера – магнитосфера в средних широтах). Отметим, что потоки протонов и электронов в этот день были еще высокими. В этот период концентрация электронов возрастала на высотах 66–84 км более, чем на 50 – 150% по сравнению с невозмущенными фоновыми значениями. Сходные результаты получены нами [6] и в других экспериментах. Было высказано предположение, что столь большое увеличение N вызвано высыпанием частиц из магнитосферы. Высыпание может возникнуть в результате перераспределения захваченных частиц по питч-углам, к чему приводят либо искривления конфигурации силовых линий поля, либо уменьшение "поперечной" энергии ε_{\perp} заряженных частиц. При прохождении терминатора возможны существенные изменения тензора проводимости ионосферной плазмы и вариации компонент электрического поля E_p и E_r , а значит, и компонент ε_{\perp} . Возникающее высыпание электронов приводит к ионизации нейтральных частиц на высотах 80 – 95 км. Для обеспечения наблюдаемого роста N согласно [6, 7] требуются потоки электронов с плотностью $p \sim 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. По методике [7] на основе экспериментальных данных о вариациях N оценивались энергетические характеристики потоков электронов. Результаты расчетов показывают, что наблюдаемые вариации N в нижней ионосфере могут быть вызваны потоками электронов и протонов с $p \sim 10^7 - 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Такие значения плотности потоков электронов сходны по величине с их значениями в периоды возмущений другой природы и не представляются большими в условиях среднеширотной ионосферы [6].

В 23.00. LT 14 декабря на космодроме Vandenberg был произведен пуск космического аппарата (КА) Delta-2. После старта КА через $\Delta t \sim 10$ (на 84 – 90 км) и 50 мин (на 69 – 87 км) наблюдались кратковременные всплески-возрастания $N(z, t)$ на 50 – 150% длительностью 20 – 25 мин. Со-

гласно [6] экспериментально обнаруженные возмущения $N(z,t)$ в среднеширотной D-области через 10 – 15 мин после старта КА, исходя из времени задержки отклика, могут быть связаны с генерацией МГД-возмущений в ионосферной плазме, которые, при определенных условиях, воздействуя на радиационные пояса Земли, могут вызвать пульсирующие высыпания электронов высоких энергий. Последние могут вызывать наблюдаемые экспериментально изменения $N(z,t)$ на больших удалениях от места старта КА. Подобный механизм ранее был предложен для объяснения экспериментальных результатов, полученных во время мощных удаленных землетрясений и сильных гроз (см., напр., [2 - 6]). Оценки плотности потоков электронов для рассматриваемого эксперимента для 84 км дают $p \approx 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что не противоречит результатам [5, 6]. Наблюдаемое в период МБ увеличение N может быть вызвано ионизацией ионосферной плазмы в D-области средних широт потоками высыпающихся из магнитосферы энергичных заряженных частиц. В пользу гипотезы о высыпании заряженных частиц в среднеширотную ионосферу говорит и тот факт, что мы неоднократно визуально наблюдали (в основном в ночные часы) во время МБ (например, марте и апреле 2001 г., в октябре 2003 г., в апреле, июле и ноябре 2004 г, в январе и августе 2005 г.,) (см., напр., [2 - 6]) характерное, – типа «полярного» сияния, – свечение атмосферы (имеются фотоснимки таких явлений) длительностью 20 – 60 мин.

3. Заключение

Таким образом, в работе показано, что в периоды мощных природных явлений статистически достоверно регистрировались характерные изменения характеристик ЧО КВ сигналов и радишумов, возмущения концентрации электронов $N(z)$ в среднеширотной D-области на ~ 50–150% (и более) с характерными периодами и длительностями, которые отсутствуют в невозмущенных условиях. Анализ экспериментальных данных и вариаций параметров космической погоды позволил интерпретировать такие вариации характеристик ЧО сигналов, радишумов и $N(z)$ с помощью гипотезы о высыпаниях высокоэнергичных электронов и протонов. Подтверждением этой гипотезы является то, что в ряде экспериментов в периоды сильных МБ в течение единиц–десятков минут визуально наблюдались (и регистрировались) свечения ночного неба типа «полярного» сияния. Оценки потоков показали, что плотность потоков высыпающихся частиц составляет $p \sim 10^7 - 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Список литературы

- [1] Tyrnov O.F., Garmash K.P., Gokov A.M. et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere. *Turkish J. of Physics* // 1994. V. 18. P. 1260-1265.
- [2] Gokov A.M., Tyrnov O.F. Middle Latitude Ionospheric D-Region Responses to solar Events as Investigated by Partial Reflection Technique // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. V. 59. No 3&4. Pp. 114-134.
- [3] Гоков А.М., Гритчин А.И., Тырнов О.Ф. Экспериментальное исследование отклика среднеширотной D-области ионосферы на затмение Солнца 29 марта 2006 г. // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48. № 2. С. 241-249.
- [4] Gokov A.M., Tyrnov O.F. Peculiarities of the Middle Latitude Ionospheric D-Region Dynamics, Caused by the Solar Terminator // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. V. 60. No 3&4. P. 159-172.
- [5] Гоков А.М., Тырнов О.Ф. Экспериментальные исследования методом частичных отражений отклика среднеширотной D-области ионосферы на удалённые старты и полёты космических аппаратов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2006. Т. 46. № 5. С. 690-697.
- [6] Гоков А. М. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на природные явления. Монография. Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken. 2014. 300 с. ISBN: 978-3-659-62182-6.
- [7] Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T. Flux Parameters of Energetic Particles Affecting the Middle Latitude Lower Ionosphere // *Радиофизика и радиоастрономия*. 1998. V. 3. No2. P. 191-197.

References

- [1] Tyrnov O.F., Garmash K.P., Gokov A.M. et al. [The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere]. *Turkish J. of Physics*, 1994, vol. 18, pp. 1260 - 1265.
- [2] Gokov A.M., Tyrnov O.F. [Middle Latitude Ionospheric D-Region Responses to solar Events as Investigated by Partial Reflection Technique]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2003, vol. 59, no. 3&4, pp. 114 - 134.
- [3] Gokov A.M., Gritchin A.I., Tyrnov O.F. [The experimental study of a response of middle-latitude D-region of an ionosphere to the Sun eclipse on March 29, 2006.]. *Geomagnetism i Aeronomiya*, 2008, vol. 48, no. 2, pp. 241 - 249. (In Russian).
- [4] Gokov A.M., Tyrnov O.F. [Peculiarities of the Middle Latitude Ionospheric D-Region Dynamics, Caused by the Solar Terminator]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2003, vol. 60, no. 3&4, pp. 159 - 172.
- [5] Gokov A.M., Tyrnov O.F. [The experimental studies by method of partial reflections of a response of middle-latitude D-region of an ionosphere to remote starts and flights of spacecrafts] *Geomagnetism i Aeronomiya*, 2006, vol. 46, no. 5, pp. 690 - 697. (In Russian).
- [6] Gokov A.M. [Response of middle-latitude D- region of an ionosphere to the natural phenomena]. *Monograph*. Publisher: LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken. 2014. 300 p. (In Russian).
- [7] Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T. [Flux Parameters of Energetic Particles Affecting the Middle Latitude Lower Ionosphere]. *Radiofizika i radi astronomiya*, 1998, vol. 3, no. 2, pp. 191 - 197.